

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

Клопот Ярослав Николаевич

**АКСИАЛЬНАЯ АНОМАЛИЯ
И ПЕРЕХОДНЫЕ ФОРМФАКТОРЫ МЕЗОНОВ**

01.04.02 – Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2014

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Олег Валерианович Теряев
(нач. сектора, ОИЯИ, г. Дубна)

Научный консультант: кандидат физико-математических наук
Армен Гургенович Оганесян
(ст. н. с., ФГБУ “ГНЦ РФ ИТЭФ”, г. Москва)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Сергей Александрович Ларин
(вед. н. с., ИЯИ РАН, г. Москва)

доктор физико-математических наук
Дмитрий Игоревич Мелихов
(вед. н. с., НИИЯФ МГУ, г. Москва)

Ведущая организация: Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Защита состоится “___” _____ 2014 г. в ___ ч. ___ мин. на заседании
диссертационного совета Д 720.001.01 в Лаборатории теоретической физи-
ки им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований,
141980, г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛТФ ОИЯИ.

Автореферат разослан “___” _____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук

А.Б. Арбузов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования и актуальность темы.

Переходные формфакторы псевдоскалярных мезонов на протяжении многих лет привлекают большое внимание, так как они позволяют проверить предсказания КХД на разных масштабах: в высокоэнергетической области предсказания пертурбативной КХД, при низких же энергиях переходные формфакторы тесно связаны с такими фундаментальными явлениями как аксиальная (киральная) аномалия и нарушение киральной инвариантности.

Недавние экспериментальные данные коллабораций BABAR и BELLE вызвали значительный рост интереса к теме о переходном формфакторе. Неожиданное поведение переходного формфактора пиона, измеренное в эксперименте BABAR привели к необходимости рассмотрения существенных модификаций пионной функции распределения, в том числе и нарушающих факторизацию.

Изучение переходных формфакторов с помощью предложенного в диссертации метода, основанного на дисперсионном представлении аксиальной аномалии (аномальные правила сумм), позволяет получить единое описание переходных формфакторов при произвольных переданных импульсах, справедливое даже в случае нарушения факторизации.

Предложенный метод позволяет также детально изучить смешивание η и η' мезонов, параметры которого используются при вычислении многих процессов с участием этих псевдоскалярных мезонов.

Аномальное правило сумм допускает также аналитическое продолжение во времениподобную область, где устанавливается связь с моделью векторной доминантности.

Цель работы.

Целью настоящей диссертации является исследование переходных формфакторов мезонов посредством аномальных правил сумм и развитие используемого метода аномальных правил сумм.

Научная новизна и практическая ценность.

Результаты, изложенные в диссертации являются оригинальными и новыми. Результаты опубликованы в ведущих российских и зарубежных журналах, докладывались на международных конференциях. Работы известны в научном сообществе и цитируются в работах других авторов.

Разработанные в диссертации методы могут служить основой для исследования широкого класса процессов с участием реальных и виртуальных фотонов. Полученные результаты могут найти новое применение в ближайшем будущем - ожидаются высокоточные экспериментальные данные по переходным формфакторам от коллабораций BES-III, KLOE-2 (в пространственноподобной области по переданным импульсам) и CLAS (во времениподобной области по переданным импульсам).

Разработанный подход также может быть применен для исследования ряда процессов, исследуемых на Большом адронном коллайдере, в частности, редкого процесса $Z^0 \rightarrow \pi^0 \gamma$.

Значительный интерес представляет использование разработанных методов для исследования процессов при столкновениях тяжелых ионов. Несколько недавно открытых эффектов, возникающих в таких столкновениях и связанных с аксиальной аномалией, таких как киральный магнитный эффект, уже преобрели известность.

На защиту выдвигаются следующие результаты:

- Исходя из точного непертурбативного аномального правила сумм получена формула для переходного формфактора пиона. Она справедлива даже при нарушении КХД факторизации за счет поправки, выходящей за рамки операторного разложения. Проведен анализ современных экспериментальных данных показывающий, что они не

исключают наличие такой поправки, хотя и не указывают однозначно на её существование. В случае, когда КХД факторизация выполняется, полученная формула обосновывает интерполяционную формулу Бродского-Лепажя.

- Метод кварк-адронной дуальности распространен на случай сильного смешивания адронных состояний. Получен критерий для выбора схемы смешивания псевдоскалярных состояний, следующий из совпадения интервалов дуальности в двухточечных и трёхточечных корреляторах.
- Из аномального правила сумм в октетном канале получена связь между переходными формфакторами и константами распадов η и η' мезонов. Проведен анализ экспериментальных данных, позволяющий извлечь константы распадов в различных схемах смешивания. Установлено, что современная точность экспериментальных данных допускает наличие непертурбативной поправки того же порядка, что и в случае пиона.

Апробация работы.

Результаты диссертации докладывались на научных семинарах, международных конференциях и школах:

- Семинар “Физика адронов”, ЛТФ ОИЯИ, 21.06.2013, “Аксиальная аномалия и переходные формфакторы псевдоскалярных мезонов”.
- International conference “Hadron Structure’13”, Tatranske Matliare, Slovak Republic, June 30 – July 4, 2013, “Transition form factors of π^0 , η and η' mesons: What can be learned from anomaly sum rule?”.
- International school-seminar “New physics and quantum chromodynamics at external conditions”, Dnipropetrovsk, May 22-24, 2013, “Anomaly sum rules: new exact NPQCD method ”.
- XXI International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems “Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics”, JINR, Dubna, September 10 - 15, 2012, “Nonperturbative QCD and transition form factors”.

- International conference “Light Cone 2012”, Cracow, Poland, July 8 - 13, 2012, “Axial anomaly and light cone distributions”.
- Семинар, Theory department of KEK, Tsukuba, Japan, March 14, 2012. “Axial anomaly and transition form factors of pseudoscalar mesons”.
- International conference of young scientists “Modern Problems of Theoretical Physics”, Kiev, Ukraine, December 21-23, 2011, “Quark-hadron duality, axial anomaly and transition form factors of pseudoscalar mesons”.
- International conference “Hadron Structure '11” , Tatranska Strba , Slovak Republic, 27 June - 01 July 2011, “Anomaly, mixing and transition form factors of pseudoscalar mesons”.
- Семинар, Centre de Physique Theorique, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, 23 June 2011, “Axial anomaly, quark-hadron duality and transition form factors of pseudoscalar mesons”.
- Advanced Studies Institute - Symmetries and Spin, Prague, Czech Republic, July 18-25, 2010, “Quark-hadron duality, 't Hooft's principle and axial anomaly”.
- International conference “Hadron Structure and QCD: From Low to High Energies”, PNPI, Gatchina, Russia, July 05-09, 2010, “Transition form factors of mesons and axial anomaly”.

Публикации.

Диссертация написана на основании содержания 9 работ [1–9] , 4 из них опубликованы в рецензируемых международных журналах [1–4], 5 опубликованы в качестве материалов конференций [5–9].

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем диссертации 93 страниц машинописного текста, включая 15 рисунков, 1 таблицы и списка литературы из 98 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлен краткая характеристика диссертационной темы, сделан обзор основных понятий и результатов, изложена мотивация исследований по теме диссертации. Также кратко описаны результаты, полученные в каждой из глав диссертации.

В первой главе “Аномальное правило сумм и переходный формфактор пиона” приводится описание вывода аномального правила сумм в изовекторном канале, которое затем применяется для исследования переходного формфактора пиона. Обсуждается коллективный эффект мезонного спектра. Из аномального правила сумм получено обоснование интерполяционной формулы Бродского-Лепажжа для переходного формфактора пиона:

$$F_{\pi\gamma}(Q^2) = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi^2 f_\pi} \frac{1}{1 + Q^2/(4\pi^2 f_\pi^2)}. \quad (1)$$

Это выражение описывает переходный формфактор пиона при произвольных виртуальностях фотона Q^2 и зависит только от константы распада пиона f_π , которая известна с хорошей точностью из распада заряженного пиона.

Проведено сравнение с экспериментальными данными коллабораций CELLO, CLEO, BABAR и BELLE. В связи с противоречивыми данными BABAR, проведено исследование возможности поправки к переходному формфактору пиона. Предложен вид такой поправки, основываясь на общих свойствах аномального правила сумм. Определены параметры этой поправки, исходя из различных наборов данных. На Рис. 1 приведен график для формфактора пиона с учетом поправки (по данным CELLO+CLEO+BABAR) и без поправки.

Во второй главе “Октетный канал аномального правила сумм и смешивание” приводится исследование адронных вкладов в октетном канале аномального правила сумм. В этом канале низшие адронные вклады дают значительно смешивающиеся η и η' мезоны:

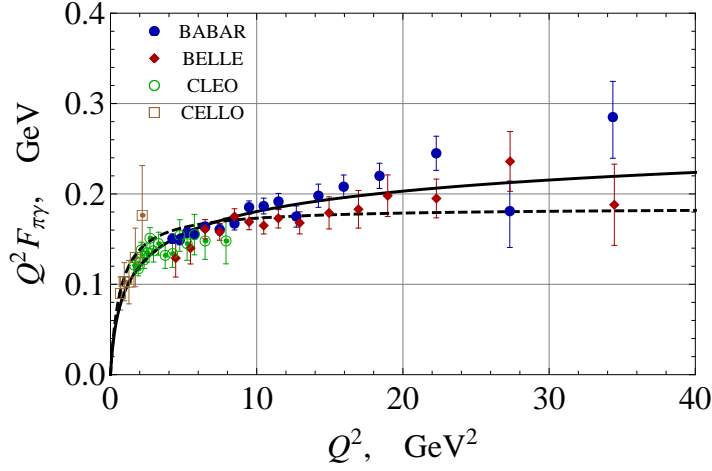


Рис. 1: Переходный формфактор пиона (умноженный на Q^2) с учетом поправки (непрерывная кривая) и без учета поправки (пунктирная кривая).

$$f_{\eta}^8 F_{\eta\gamma}(Q^2) + f_{\eta'}^8 F_{\eta'\gamma}(Q^2) = \frac{1}{2\sqrt{6}\pi^2} \frac{s_0^{(8)}}{s_0^{(8)} + Q^2}, \quad (2)$$

Исследуются различные схемы смешивания в η - η' системе. Определяются константы распада η и η' мезонов в разных схемах смешивания, а также схемно-независимым образом. Получен критерий для выбора схемы смешивания псевдоскалярных состояний, следующий из совпадения интервалов дуальности в двухточечных и трёхточечных корреляторах. Выбор схемы смешивания приводит к уравнению, связывающему константы распада мезонов. Обсуждается численное значение порога континуума в октетном канале.

На Рис. 2 в качестве примера приведен график для октетной комбинации переходных формфакторов η и η' мезонов для констант распада, полученных в октет-синглетной схеме смешивания (с учетом и без учета поправки).

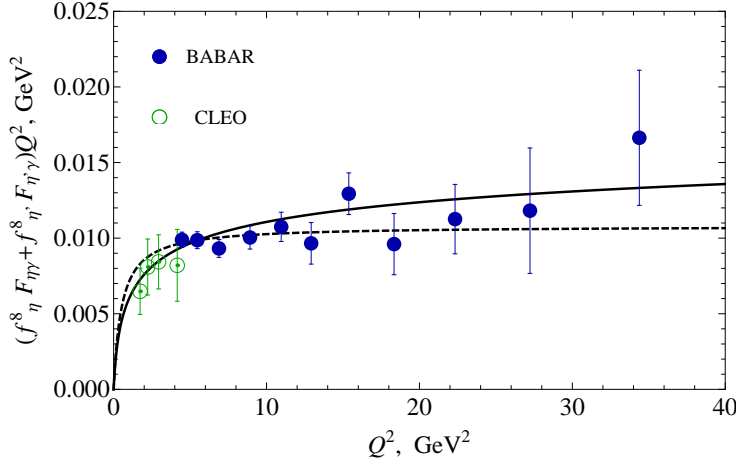


Рис. 2: Октетная комбинация переходных формфакторов η, η' мезонов с поправкой (непрерывная кривая) и без поправки (пунктирная кривая) с константами распада, полученными в октет-синглетной схеме смешивания.

В третьей главе “Переходные формфакторы η и η' мезонов” с использованием аппарата, разработанного во второй главе, получены выражения для переходных формфакторов η и η' мезонов:

$$F_{\eta\gamma}(Q^2) = \frac{5}{12\pi^2 f_s f_\pi} \frac{s_0^{(3)}(\sqrt{2}f_s \cos \phi - f_q \sin \phi)}{s_0^{(3)} + Q^2} + \frac{1}{4\pi^2 f_s} \frac{s_0^{(8)} \sin \phi}{s_0^{(8)} + Q^2}, \quad (3)$$

$$F_{\eta'\gamma}(Q^2) = \frac{5}{12\pi^2 f_s f_\pi} \frac{s_0^{(3)}(\sqrt{2}f_s \sin \phi + f_q \cos \phi)}{s_0^{(3)} + Q^2} - \frac{1}{4\pi^2 f_s} \frac{s_0^{(8)} \cos \phi}{s_0^{(8)} + Q^2}, \quad (4)$$

и проведено сравнение с экспериментальными данными (см. Рис. 3). Исследованы поправки от масс кварков.

Исследуются переходные формфакторы во времениподобной области, обсуждается связь с моделью векторной доминантности. В случае переходного формфактора η мезона проведено сравнение теоретического результата с доступными экспериментальными данными во времениподобной области (см. Рис. 4).

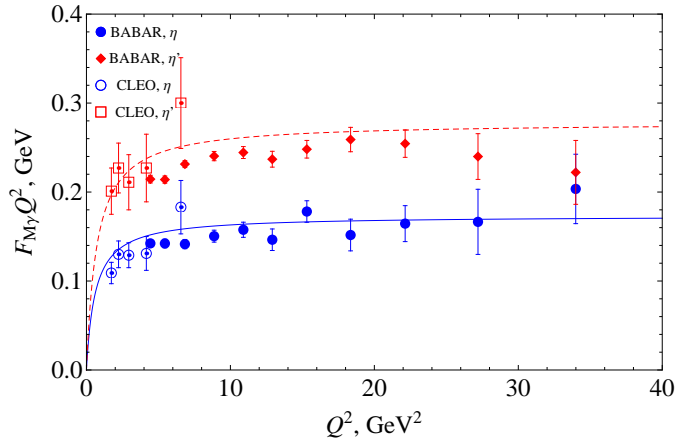


Рис. 3: Переходные формфакторы $F_{\eta\gamma} Q^2$ (синяя непрерывная линия) и $F_{\eta'\gamma} Q^2$ (красная пунктирная линия) и экспериментальные данные.

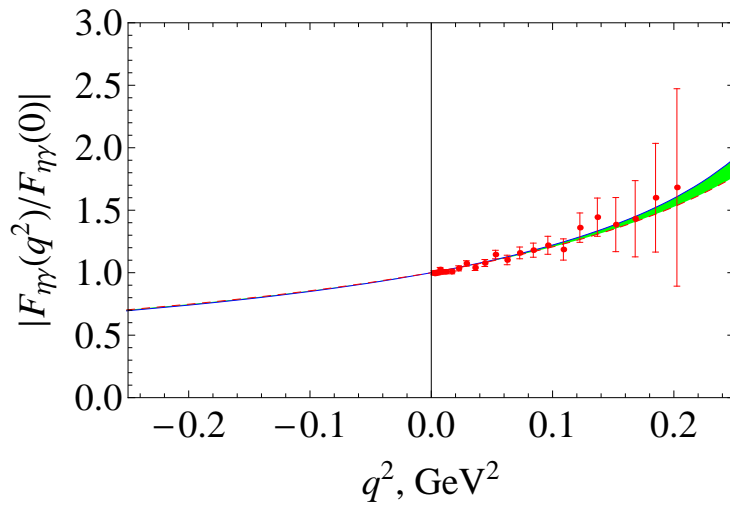


Рис. 4: Переходный формфактор η мезона (нормированный на свое значение при $Q^2 = 0$, полоса замечает разброс в параметрах смешивания) и экспериментальные данные коллаборации A2.

В заключении сформулированы полученные в диссертации результаты, которые и выносятся на защиту.

Литература

- [1] Y. N. Klopot, A. G. Oganesian and O. V. Teryaev, “Axial anomaly as a collective effect of meson spectrum,”
Physics Letters B **695**, 130-135 (2011) [arXiv:1009.1120].
- [2] Y. N. Klopot, A. G. Oganesian and O. V. Teryaev, “Axial anomaly and mixing: from real to highly virtual photons,”
Physical Review D **84**, 051901 (2011), 5 pages. [arXiv:1106.3855].
- [3] Y. Klopot, A. Oganesian and O. Teryaev, “Quark-hadron duality, axial anomaly and mixing,”
JETP Letters **94**, 729-733 (2011) [arXiv:1110.0474].
- [4] Y. Klopot, A. Oganesian and O. Teryaev, “Transition Form Factors and Mixing of Pseudoscalar Mesons from Anomaly Sum Rule,”
Physical Review D **87**, 036013 (2013), 12 pages. [arXiv:1211.0874].
- [5] Y. Klopot, A. Oganesian and O. Teryaev, “Anomaly, mixing and transition form factors of pseudoscalar mesons,”
Nuclear Physics B - Proceedings Supplements **219-220**, 141-144 (2011).
- [6] Y. N. Klopot, A. G. Oganesian and O. V. Teryaev, “Axial anomaly, quark-hadron duality and transition form factors,” Physics of Particles and Nuclei Letters **9**, 769-771 (2012).
- [7] Y. Klopot, A. Oganesian and O. Teryaev, “Axial Anomaly and Light Cone Distributions,” Acta Physica Polonica Supplements **6**, 145-150 (2013) [arXiv:1212.0459].

- [8] Y. Klopot, A. Oganesian and O. Teryaev, “Nonperturbative QCD and Transition Form Factors,”
Proceedings of Science, Baldin -**ISHEPP-XXI**, 036 (2012), 8 pages.
- [9] Y. Klopot, A. Oganesian and O. Teryaev, “Transition form factors of π^0 , η and η' mesons: What can be learned from anomaly sum rule?,”
Nuclear Physics B - Proceedings Supplements **245**, 255-258 (2013)
[arXiv:1308.5184].